

BN/Si₂N₂O复合陶瓷微波介电性能研究

赵华顺, 张 婷, 刘小莹*

成都医学院大健康与智能工程学院, 生物医学工程教研室, 四川 成都

收稿日期: 2026年9月18日; 录用日期: 2026年10月15日; 发布日期: 2026年10月23日

摘 要

透波天线罩材料是保障火箭、飞船、导弹等飞行武器装备在极端环境下实现通讯、测距与制导功能的关键部件, 随着飞行速度不断提升, 对其高温性能的要求日益苛刻。氮氧化硅(Si₂N₂O)陶瓷凭借独特的晶体结构与化学性能在高温透波材料领域脱颖而出, 而氮化硼(BN)具有极高的分解温度和优异的介电性能, 作为添加剂引入复相材料可显著提升透波性能。然而, 极端高温条件下材料性能演变规律的实验测试成本高、实现困难, 因此采用理论模拟方法进行预测具有重要意义。本文通过谐振腔法测试了单体Si₂N₂O和BN陶瓷的微波介电常数与损耗, 并采用GEM对数定律建立了Si₂N₂O/BN复相陶瓷介电常数与介电损耗的预测模型。研究发现, 复相陶瓷的介电常数与Si₂N₂O含量正相关、与BN添加量负相关, 这是由于低介电常数BN含量上升导致高介电常数Si₂N₂O含量降低, 同时体系气孔率随BN加入呈升高趋势, 二者综合作用使介电常数不断降低, 从而提升透波性能。复相陶瓷的介电损耗随温度升高呈现先缓慢变化、后急剧上升的趋势; 相同温度下, BN基复合陶瓷(Si₂N₂O含量为10%)的介电损耗整体略高于Si₂N₂O基复合陶瓷(BN含量为10%), 表明BN的引入对介电损耗有一定影响。因此, 工程应用中应适度控制BN相含量以优化Si₂N₂O/BN复相透波陶瓷的透波性能。研究结果为航天天线罩透波材料及高温功能复合陶瓷的制备与应用提供了新的热电分析方法的理论依据和参考基础。

关键词

复合陶瓷, 介电损耗, 混合物法则, 温度

Research on Microwave Dielectric Loss of BN/Si₂N₂O Composite Ceramics

Huashun Zhao, Ting Zhang, Xiaoying Liu*

Department of Biomedical Engineering, School of Great Health and Intelligent Engineering, Chengdu Medical College, Chengdu Sichuan

Received: September 18, 2026; accepted: October 15, 2026; published: October 23, 2026

*通讯作者。

文章引用: 赵华顺, 张婷, 刘小莹. BN/Si₂N₂O 复合陶瓷微波介电性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(10): 145-152.
DOI: 10.12677/ms.2026.1610199

Abstract

Radome-Transparent materials are key components to ensure the communication, ranging and guidance functions of aircraft such as rockets, spacecraft and missiles under extreme environments. With the continuous increase of flight speed, the requirements for their high-temperature performance are becoming increasingly stringent. Silicon oxynitride ($\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$) ceramics stand out in the field of high-temperature wave-transparent materials owing to its unique crystal structure and chemical properties. Boron nitride (BN) possesses an ultra-high decomposition temperature and excellent dielectric properties. Adding BN as additive into multiphase materials can significantly improve wave-transparent performance. Nevertheless, experimental measurement for material-property evolution under extremely high temperature is costly and difficult to implement. Hence, theoretical simulation prediction bears great practical significance. In this work, microwave dielectric constant and dielectric loss of monolithic $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ and BN ceramics were measured by resonant-cavity method. A prediction model for dielectric constant and dielectric loss of $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ /BN composite ceramics was established based on the GEM logarithmic law. The results show that the dielectric constant of composite ceramics is positively correlated with $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ content and negatively correlated with BN content. Increasing BN fraction reduces the volume fraction of high-permittivity $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$, meanwhile the porosity of composite system increases with BN addition. The combined effect reduces the effective dielectric constant and improves wave-transparent performance. The dielectric loss of composite ceramics changes slightly at first and then rises sharply with increasing temperature. At identical temperature, BN-based composite ceramic (10 vol% $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$) exhibits slightly higher dielectric loss than $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ -based composite ceramic (10 vol% BN), which indicates that BN addition imposes obvious influence on dielectric loss. Therefore, BN content should be properly controlled in engineering practice to optimize the wave-transparent property of $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ /BN composite ceramics. This work provides theoretical basis and reference for preparation and application of aerospace radome materials and high-temperature functional composite ceramics.

Keywords

Composite Ceramics, Dielectric Loss, Mixture Rule, Temperature

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

透波天线罩材料已在火箭、飞船、导弹等飞行武器装备中广泛应用，并随着飞行武器装备服役条件苛刻程度的提高而越来越受到重视。高性能的透波天线罩材料成为保障尖端飞行武器装备在极端环境下通讯、测距、制导等功能的必要条件[1]-[3]。由于近现代航空工业的发展，航天飞行器的飞行速度不断得到提升，这就更进一步促进了氮化硅(Si_3N_4)、氮氧化硅($\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$)等氮化物高温材料的快速发展，其中氮氧化硅($\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$)陶瓷材料凭借自身独有的晶体结构和化学性能在高温透波材料研究领域中脱颖而出[4] [5]。氮化硼(BN)是一种高温材料，有极高的分解温度(一般在 3000°C)和非常优异的介电性能，可以很好的利用氮化硼(BN)的这些优点，在制造高温透波材料时，作为添加剂到复相材料中可以显著提高复相材料的透波性能[6]。为了判断材料在长时间高温条件下是否能维持正常性能，必须预先了解材料的性能演变规律。令人遗憾的是，现代测试技术成本高、实现困难，而采用模拟方法来预测材料在极端条件下的热电行为规律就变得非常重要。本文通过测试的单体材料微波介电性能数据，采用目前广泛应用的 GEM 混

合物理论模型对氮氧化硅/氮化硼复合陶瓷材料的介电常数和损耗进行理论计算。研究结果为航天天线罩透波材料、高温功能复合陶瓷的制备及应用提供新的热电分析方法的理论根据和参考基础。

2. 理论模型和计算方法

对于混合物材料计算的理论模型较多[7]-[15], 本文对复相陶瓷介电性能计算时, 主要选择其中应用范围最广的广义等效介质方程(GEM 方程):

渗流相变理论主要是对两相复合媒介的等效性能进行分析, McLachlan 把该理论和等效介质理论融合在一起, 从而得到了广泛意义上的等效介质方程(GEM 方程) [10]:

$$\frac{V_l(\varepsilon_l^{1/t} - \varepsilon_f^{1/t})}{\varepsilon_l^{1/t} + A\varepsilon_f^{1/t}} + \frac{V_h(\varepsilon_h^{1/t} - \varepsilon_f^{1/t})}{\varepsilon_h^{1/t} + A\varepsilon_f^{1/t}} = 0 \quad (1)$$

其中, t 是指数参数。GEM 方程也是目前为止对于混合物等效性能预测的最为准确的一个方程式。在具体运用时, 通过一定的简化处理, 可以通过下式来表示公式(1):

1) 并联规则

$$\varepsilon_f = V_h \varepsilon_h + V_l \varepsilon_l \quad (2)$$

并联规则通常用于描述两相排列平行于电场的情况。

2) 串联规则

$$\frac{1}{\varepsilon_f} = \frac{V_l}{\varepsilon_l} + \frac{V_h}{\varepsilon_h} \quad (3)$$

串联规则通常用于描述两相排列垂直于电场的情况。

3) 指数规则

$$\varepsilon_f^n = V_l \varepsilon_l^n + V_h \varepsilon_h^n \quad (4)$$

指数规则又称超越广义对数规则, 它包含了三种常见的规则。当 $n=1$ 时, 为并联规则; 当 $n=-1$ 时, 为串联规则; 当 $-1 < n < 1$ 时, 为串联并联混合情况, 当 $n \rightarrow 0$, 即为对数法则:

$$\log \varepsilon_f = V_l \log \varepsilon_l + V_h \log \varepsilon_h \quad (5)$$

对于一般的陶瓷烧结体, 陶瓷当中的相不可用全部串联, 同时也不能全部平行排列, 然而往往会均匀且随机地通过串并联的形式来分布, 所以一般会使用对数律对其介电常数进行描述[16]。

GEM 方程也有很多其他广泛意义上的形式, 诸如 Weiner 规则, 它的形式和 Maxwell-Wagner 方程大致类似。Hasin 与 Shtrikman 推导出按照 GEM 方程而计算出介电常数的上下限值, 也即是:

$$\varepsilon_{upper} = \varepsilon_h + \frac{V_l}{\frac{1}{\varepsilon_l - \varepsilon_h} + \frac{V_h}{3\varepsilon_h}}, \varepsilon_{lower} = \varepsilon_h + \frac{V_h}{\frac{1}{\varepsilon_h - \varepsilon_l} + \frac{V_l}{3\varepsilon_l}} \quad (6)$$

和 Maxwell-Wagner 方程、Bruggeman 对称等效理论比较起来, GEM 方程有着更强的适用性, 同时对介电常数进行预测时也会更加准确。事实上, GEM 方程不但能够对复合材料的介电常数进行描述, 同时也能用来计算得出电导率、导热率以及磁导率等。

3. 实验测试

3.1. Si₃N₄ 介电性能测试数据

以氮化硅(Si₃N₄)作为原料, 当有氧气的情况下, 利用方程式 $2\text{Si}_3\text{N}_4 + 1.5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 进行烧结制备

氮氧化硅陶瓷。在微波频段内, 高温时测试低损耗的透波材料介电性能根据测试原理的不同可以分为谐振法和网络参数法这两大类。本次实验采用谐振腔法测量陶瓷的微波介电性能数据, 谐振腔法是一种测试精度较高的测试方法, 需先将待测材料放到各种微波谐振腔内, 对比前后的谐振频率和品质因数差异, 再利用电磁场理论推导出介质的复介电常数, 该方法的测试精度较高[17]。本实验测试频率范围在 18 GHz 到 40 GHz 之间, 温度范围在 25℃到 1200℃之间。图 1 给出了 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 陶瓷材料微波介电常数以及介电损耗随温度的变化值。从图中可以看出, $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 陶瓷材料的介电常数在 500℃以上总体随温度升高而增加。主要是因为离子位移极化随温度升高而增大。 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 的微波总损耗包括弛豫损耗、电导率损耗和杂质离子损耗。在 1000℃以下观察到较低的介电损耗。然而, 在 1000℃以上, 随着温度的升高, 损耗开始显著上升, 在 1138℃时达到 0.0185。氮氧化硅的禁带宽度达到 5.97 eV, 高于氮化硅的 5.3 eV, 因此在分解前具有比氮化硅更小的高温介电损耗, 这也是其在高温透波应用中优于传统氮化硅材料的关键原因之一。

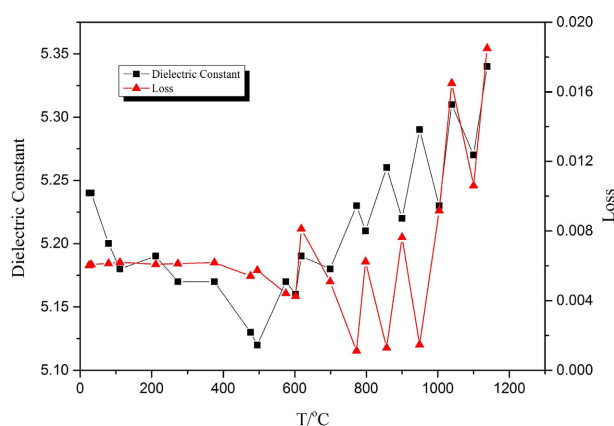


Figure 1. Test data of dielectric constant and loss of $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$
图 1. $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 介电常数和损耗的测试数据

3.2. BN 介电性能测试数据

BN 陶瓷实验测试的微波频率范围在 18 GHz 到 40 GHz 之间, 测试温度在 25℃到 1200℃之间。图 2 给出了 BN 陶瓷材料介电常数与介电损耗随着温度的变化情况。从图中可以看出, 其介电常数与损耗在 1000℃以上随温度升高而增加, 1138℃时介电常数为 4.32, 损耗增大到 0.0529。介电损耗的上升会直接降低透波效率。对于以氮氧化硅陶瓷为候选材料的高马赫数飞行器天线罩而言, 高温时 0.0529 的损耗值意味着电磁波穿过罩体时能量吸收显著增加, 可能导致信号衰减加剧, 此时材料已不适用。

4. $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ /BN 复相陶瓷介电性能计算

采用实验测得的数据做为单体材料的介电常数的输入数据, 选取 GEM 法则进行 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ /BN 复相陶瓷介电常数的预测。根据工程应用需要, 分别研究 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基和 BN 基复相陶瓷材料的介电性能。

4.1. 介电常数计算

图 3, 图 4 分别给出了基于 GEM 对数法则的 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基和 BN 基复相陶瓷材料的介电常数计算结果。图 3 和图 4 可以看出。同样在选择研究 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ /BN 复合材料时, 复合体系的温度越高, $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 含量越多, 所得到的复合陶瓷的介电性能也越高。同时复合材料的介电常数与 BN 的添加量成负相关性, 即 BN 的添加量越大, 复合材料的介电常数越小。理论模型的预测结论与文献中实验测试数据一致[18]。材料的介电性能主要受到复合材料的物相组成与分布比例、气孔率的影响, 由于低介电常数的 BN 含量逐渐上升,

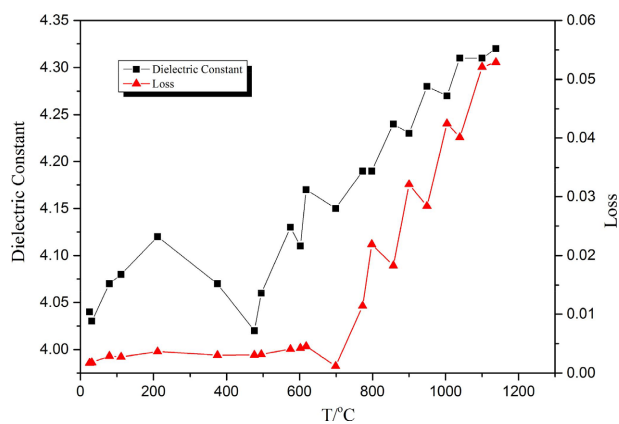


Figure 2. Test data of BN dielectric constant and loss

图 2. BN 介电常数和损耗的测试数据

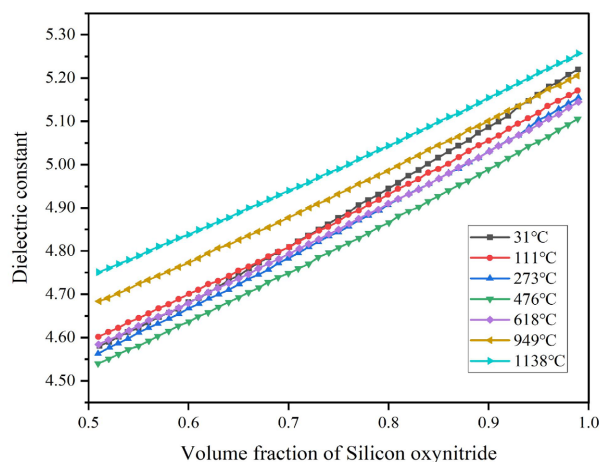


Figure 3. Dielectric constant of $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ -based composite ceramics at different temperatures

图 3. $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基复合陶瓷在不同温度下的介电常数

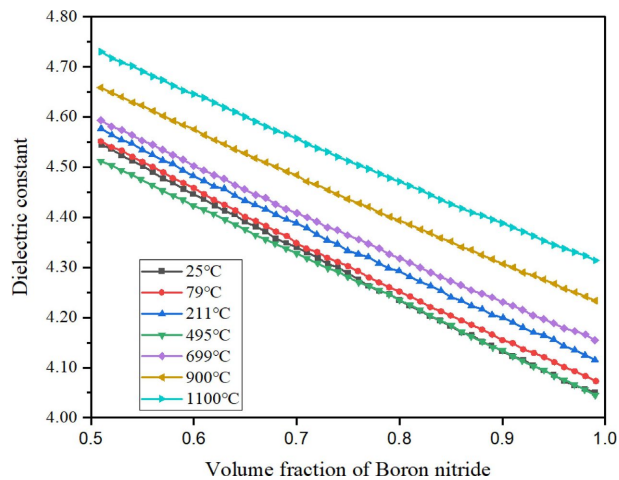


Figure 4. Dielectric constants of BN-based composite ceramics at different temperatures

图 4. BN 基复合陶瓷在不同温度下的介电常数

导致复合材料中高介电常数 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 含量降低, 并且一般复合材料的相对密度与气孔率的变化可知, 气孔率随着 BN 的加入呈升高趋势, 在两者的综合作用下, 使得材料的介电常数不断降低, 从而提升了复合材料的透波性能。

4.2. 介电损耗计算

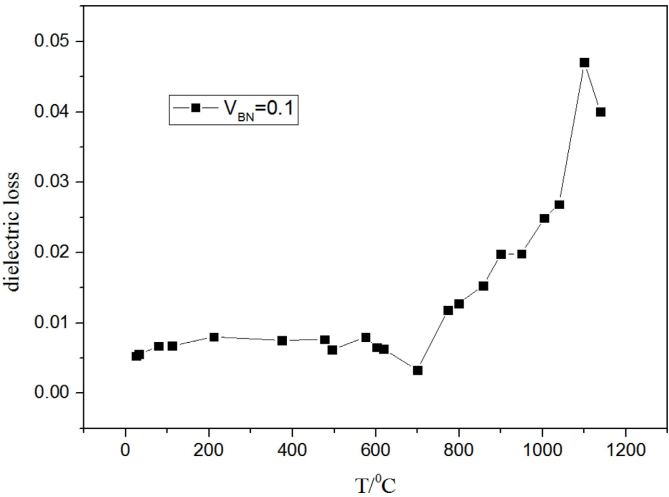


Figure 5. Dielectric loss of $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ -based composite ceramics (BN content is 10%) at different temperatures

图 5. $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基复合陶瓷(BN 含量为 10%)在不同温度下的介电损耗

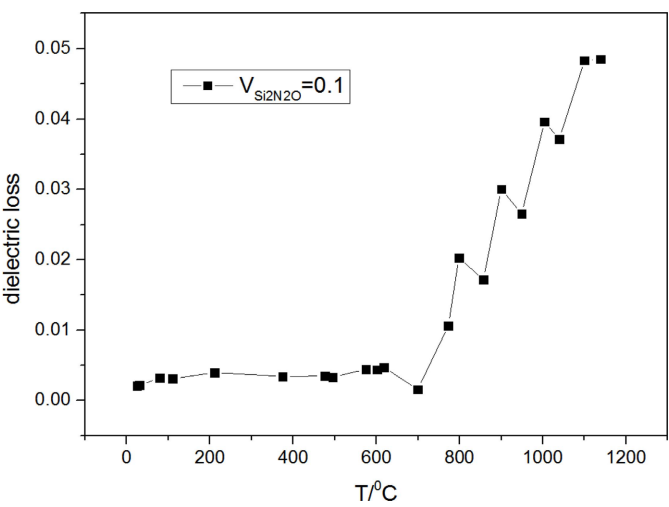


Figure 6. Dielectric loss of BN-based composite ceramics ($\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ content is 10%) at different temperatures

图 6. BN 基复合陶瓷($\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 含量为 10%)在不同温度下的介电损耗

介电损耗中的电导损耗受温度影响很大。因此, 图 5 和图 6 分别给出了基于 GEM 对数法则的 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基(BN 含量为 10%)和 BN 基($\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 含量为 10%)复相陶瓷材料在不同温度下的介电损耗。从图 5 和图 6 可以看出, 同样在选择研究 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ /BN 复合陶瓷材料时, 复合体系的温度越高, 两种复合陶瓷的介电损耗均呈现先缓慢变化、后急剧上升的趋势。这是因为陶瓷材料内部的载流子(如电子、离子或缺陷)在高温下获得足够热能, 电导率随温度呈指数增加, 导致介电损耗随之快速上升。在较低温度阶段(约 700 °C 以

下),介电损耗随温度升高变化不大,基本维持在较低水平(约 0.005~0.008);而当温度超过 700℃后,介电损耗随温度升高显著增大,在 1138℃达到峰值(0.04~0.05)。介电损耗的“先缓后急”曲线,本质上是极化损耗(受热激活逐步增强)与电导损耗(随温度指数增长)两种机制竞争与叠加的结果。在低温段,极化损耗缓慢变化,电导损耗尚不显著;当温度升高至某一临界区间,电导损耗迅速占据主导,导致损耗急剧上升。另一方面,在高温段(>700℃),电导损耗急剧增大源于杂质离子热激活释放与晶界玻璃相软化的协同作用:实际材料中残留的 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 等碱金属离子在高温下从晶格间隙或晶界玻璃相中释放,成为主要的离子电导载体。这些碱金属离子从晶格间隙和晶界相中脱陷,迁移势垒骤降,载流子浓度与迁移率同步指数增长。同时,晶界玻璃相在高温下软化,原本阻塞的离子迁移通道被打开,电导损耗迅速占据主导。同时,对比图 5 和图 6 可知,在相同温度下,BN 基复合陶瓷($\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 含量为 10%)的介电损耗整体略高于 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基复合陶瓷(BN 含量为 10%),说明 BN 的引入对复合材料的介电损耗有一定影响。BN 基陶瓷的损耗略高的原因可能是因为 BN 连续相能提供层间离子快速迁移通道,且此时的复合陶瓷的异质界面势垒更高,空间电荷积累更强,同时 h-BN 的层状结构为碱金属离子提供了特殊的层间扩散通道,在高温下可沿层间快速迁移,形成一种“离子滑移”式的电导路径。这种迁移方式的有效激活能虽然较高,但一旦激活,其迁移速率对温度的敏感性极强,导致高温段的损耗上升更为剧烈。而 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基陶瓷中, $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 是连续相,载流子主要在其晶格和晶界中迁移。10%的 BN 颗粒虽然增加了一定的界面散射,但整体迁移路径仍以 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 的晶界网络为主,路径相对“规整”。同时 BN 在 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基复合陶瓷中以孤立绝缘岛分散,界面极化与空间电荷效应相对较弱,故损耗略低。

5. 结论

(1) 本文通过谐振腔法分别测试了单体陶瓷 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 和 BN 的微波介电常数和损耗,同时采用 GEM 对数定律,建立 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ /BN 复相陶瓷介电常数和介电损耗预测模型。

(2) 研究结果发现, $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ /BN 复相陶瓷的介电常数与 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 的含量正相关而和 BN 的添加量成负相关性,即 BN 的添加量越大,复合材料的介电常数越小。理论模型的预测结论与文献中实验测试数据一致。这是因为低介电常数的 BN 含量逐渐上升,导致复合材料中高介电常数 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 含量降低,同时体系的气孔率随着 BN 的加入呈升高趋势,在两者的综合作用下,使得材料的介电常数不断降低,从而提升了复合材料的透波性能。

(3) 复合陶瓷的介电损耗均呈现先缓慢变化、后急剧上升的趋势,其原因本质上是极化损耗(受热激活逐步增强)与电导损耗(随温度指数增长)两种机制竞争与叠加的结果,也有可能是载流子热激活与晶格缺陷释放的协同结果。

(4) 相同温度下,BN 基复合陶瓷($\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 含量为 10%)的介电损耗整体略高于 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基复合陶瓷(BN 含量为 10%),说明 BN 的引入对复合材料的介电损耗有一定影响。而 BN 基与 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基复合材料的损耗差异,则源于界面势垒高度与载流子迁移路径的微观差异。因此,在工程应用中,想要改善 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ /BN 复相透波陶瓷材料的透波性能,应适度控制其中 BN 相的含量。

基金项目

四川省科技厅重点研发项目(2023YFG0223)。

参考文献

- [1] 姚琪,张振林,宫剑. 耐高温/隐身/透波一体化天线罩材料的研究进展[J]. 当代化工研究,2018(12): 6-7.
- [2] 徐银芳,邹辉辉,李恩,等. 短路波导法测试低损耗透波材料高温复介电常数[J]. 导弹与航天运载技术,2017(5):

- 103-106.
- [3] Lin, S., Ye, F., Dong, S., Ma, J., Zhang, B. and Ding, J. (2015) Mechanical, Dielectric Properties and Thermal Shock Resistance of Porous Silicon Oxynitride Ceramics by Gas Pressure Sintering. *Materials Science and Engineering: A*, **635**, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.064>
- [4] Wen, J., Wang, H., Fan, L., Wei, L., Niu, M., Gao, H., *et al.* (2019) Influences of Rare-Earth Oxide Additives on the Formation and Properties of Porous $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ Ceramic. *Journal of the American Ceramic Society*, **102**, 136-143. <https://doi.org/10.1111/jace.15886>
- [5] 金海泽. $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基陶瓷的水基直写成型工艺与性能研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [6] 毛富洲, 银锐明, 李鹏飞, 等. 天线罩用高温透波陶瓷材料的研究进展[J]. 硬质合金, 2022, 39(2): 149-155.
- [7] 原玉. 电介质材料的介电行为研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [8] Yoon, S.H., Choi, G., Kim, D., Cho, S. and Hong, K.S. (2007) Mixture Behavior and Microwave Dielectric Properties of $(1-x)\text{CaWO}_4\text{-}x\text{TiO}_2$. *Journal of the European Ceramic Society*, **27**, 3087-3091. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.11.035>
- [9] Bruggeman, D.A.G. (1935) Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen. *Annalen der Physik*, **24**, 635-679.
- [10] 李滚, 张亮, 杜宁, 等. 生物体系介电性质的复合材料理论模型[J]. 材料导报, 2017, 31(15): 36-41.
- [11] Liu, X.Q. and Chen, X.M. (2004) Microstructures and Dielectric Properties of $\text{CaTiO}_3\text{-LaSrAlO}_4$ Composite Ceramics. *Materials Science and Engineering: B*, **110**, 296-301. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2004.04.005>
- [12] Guo, M., Dou, G., Gong, S. and Zhou, D. (2012) Low-Temperature Sintered $\text{MgWO}_4\text{-CaTiO}_3$ Ceramics with Near-Zero Temperature Coefficient of Resonant Frequency. *Journal of the European Ceramic Society*, **32**, 883-890. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.10.042>
- [13] Zhang, T., Zuo, R. and Zhang, C. (2015) Preparation and Microwave Dielectric Properties of $\text{Li}_3(\text{Mg}_{0.92}\text{Zn}_{0.08})_2\text{NbO}_6\text{-Ba}_3(\text{VO}_4)_2$ Composite Ceramics for LTCC Applications. *Materials Research Bulletin*, **68**, 109-114. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2015.03.022>
- [14] Kolodiazny, T. (2012) $\text{BaMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-Mg}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ Composite Microwave Ceramics with High Q-Factor and Low Sintering Temperature. *Journal of the European Ceramic Society*, **32**, 4305-4309. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.06.001>
- [15] Chen, W. and Hsieh, M. (2017) Dielectric Constant Calculation Based on Mixture Equations of Binary Composites at Microwave Frequency. *Ceramics International*, **43**, S343-S350. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.320>
- [16] Wu, S., Xue, J. and Fan, Y. (2014) Spinel $\text{Mg}(\text{Al}, \text{Ga})_2\text{O}_4$ Solid Solution as High-Performance Microwave Dielectric Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, **97**, 3555-3560. <https://doi.org/10.1111/jace.13157>
- [17] Li, E., Nie, Z., Guo, G., Zhang, Q., Li, Z. and He, F. (2009) Broadband Measurements of Dielectric Properties of Low-Loss Materials at High Temperatures Using Circular Cavity Method. *Progress In Electromagnetics Research*, **92**, 103-120. <https://doi.org/10.2528/pier09030904>
- [18] 杜姣龙. $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基透波陶瓷材料的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2019.